

[20] 石炭火力発電所のアッシュのコンクリート材料としての利用

正会員 小林 正 几 (法政大学)
正会員 野口 博 章 (法政大学大学院)

石炭火力発電所で微粉炭を燃焼するさいに副産されるアッシュには、ボイラーの煙道から採取分級されるフライアッシュ、粗粒アッシュのほか、ボイラー底部のアッシュピットより採取される塊状の炉底灰などがある。このうち、フライアッシュはその大部分が球形をなす良質なポゾランであり、ワーカビリティの改善、長期強度の増進、セメントの水和による温度上昇の低減などにすぐれた効果を発揮するものであるため、混和材として JIS 規格の制定もなされ、ダムを始めとする一般コンクリート構造物の建設に広く活用されてきた。しかし、副産される全アッシュ量の70%程度を占める粗粒アッシュならびに炉底灰については、ほとんど研究がなされておらず、品質について不明の点も多いためそのほとんどが埋立材として廃棄されているのが現状である。最近のわが国においては、石油危機を契機としてエネルギー源を多様化する目的で石炭火力は飛躍的に増強されるさう勢にあるが、今後は埋立地確保に環境保全上多くの問題点があることも指摘されていることから、これらの有効活用をはかることはきわめて重要なことと思われる。

本報告は、石炭火力発電所から副産される粗粒アッシュを粉砕してセメントの一部に置換えて用いたコンクリートのワーカビリティ及び圧縮強度に関する試験結果を示し、この種のアッシュの混和材としての使用について論じると共に、炉底灰を細骨材として使用する場合の問題点について実験的に検討した結果を述べたものである。

1. 使用材料およびコンクリートの配合

試験に用いた粗粒アッシュおよびフライアッシュは、電源開発 K. K. 高砂火力発電所 (A)、東京電力 K. K. 新東京火力発電所 (B) および北海道電力 K. K. 江別火力発電所 (C) の3箇所から産出されたもので、それらの比重およびブレン比表面積で表わした粉末度 (以下粉末度と略称する)、またモルタルの試験結果は表1に示すようであった。粗粒アッシュは、粉末度が 2000, 2500, 3000 および 3500 cm^2/g 程度になるよう試験用ボールミルによって微粉砕して用いた。炉底灰は、Aの発電所から産出されたもので、発電所の処理過程で 20 mm 程度以下に破砕されたものを 5 mm 以下の5種のサイズにふるい分け、川砂の一部に置換えて用いた。粗骨材は富士川産の良質な川砂利で、比重は 2.65、また吸水率は 1.00% であった。細骨材は粗粒アッシュを混用したコンクリートにおいては富士川産の川砂 (比重 2.65、吸水率 2.30%) を、また炉底灰の試験においては鬼怒川産の川砂 (比重 2.57、吸水率 2.42%) を用いた。セメントには、小野田セメント K. K. 製の普通ポルトランドセメントを用いた。

試験に用いたコンクリートは、一般のコンクリート構造物およびプレキャスト製品を対象としたものである。

すなわち、粗骨材の最大寸法を 25 mm とし、(1) 単位結合材量を 300 kg 、粉砕粗粒アッシュの重量置換率を 25%、スランブを 6~8 cm 、またコンクリートの単位水量及び細骨材率を粉砕粗粒アッシュを用いない場合とくらべてワーカビリティが同程度となるように試的に定めたもの、および(2) 単位結合材量を 500 kg 、粉砕粗粒アッシュの重量置換率を 5%、10% および 25% の3種に変え、スランブを 4~6 cm としたものの2種とした。

炉底灰を細骨材の一部に置換えた試験においては、川砂の 5 mm 以下、2.5 mm 以下、1.2 mm 以下、0.6 mm 以下あるいは 0.3 mm 以下をそれぞれの同じサイズの炉底灰で置換え、混合砂として用いた。試験に用いたコンクリートは、一般のコンクリート工事におけるものを対象とし、

表1 アッシュを用いたモルタルの試験結果

種別	区分	比重	比表面積 cm^2/g	単位* 水量比 %	圧縮強度比*			
					7日	28日	91日	
用いず	—	—	—	100	100	100	100	
フライアッシュ	A	2.24	3570	98	59	60	88	
	B	2.22	3450	98	64	65	94	
	C	2.08	2660	99	75	75	87	
粗粒アッシュ	A	未粉砕	2.08	1630	105	54	61	75
		粉砕	2.19	1970	105	60	67	76
	B	未粉砕	2.29	2420	103	63	66	83
		粉砕	2.32	2910	101	56	68	78
	C	未粉砕	2.36	3520	100	69	65	89
		粉砕	2.02	1660	105	70	65	83
	未粉砕	2.15	1990	105	72	67	79	
		2.27	2480	104	78	66	86	
	粉砕	2.33	2940	101	66	71	84	
		2.37	3470	100	70	72	89	
	未粉砕	1.93	1230	106	60	70	64	
		2.22	1920	105	64	78	83	
粉砕	2.27	2450	104	57	76	84		
	2.32	2950	100	65	84	94		
2.36	3470	101	59	84	102			
JISA 6201	規格値	1.95 以上	2400 以上	102 以下	—	60 以上	70 以上	

* : JISA 6201 「フライアッシュ」の試験によるもの

粗骨材の最大寸法を25mm、水セメント比を55%とし、また単位水量はスラブを6~8cmとし、ワーカビリチーが同じとなるように試的に定めたものである。

2. 粉碎粗粒アッシュを混用したコンクリートのワーカビリチー

粉碎粗粒アッシュの混用がコンクリートのワーカビリチーに及ぼす影響について検討するため、粉末度を各種に相違させたコンクリートの単位水量について試験した結果は図1に示すようであった。図1は粉碎粗粒アッシュを用いた場合の単位水量を、用いない場合と比較した単位水量比を表わしたものである。これによれば、未粉碎の粗粒アッシュを混用することにより、単位水量はいくぶん減少する傾向にあることが認められる。すなわち、減少の程度は2~3%であって、フライアッシュの場合の減少率が5~7%程度であるのにくらべれば、

かなり小さいが、未粉碎のまま用いても単位水量は増加しないことが示された。また、粗粒アッシュを粉碎して用いた場合においては、種類によっていくぶんは異なるが、粉末度を高めても単位水量にはほとんど影響なく、1~3%減少することが認められた。

粗粒アッシュの粉碎による影響について詳しく検討するため、光学顕微鏡によって粒子形状を観察し、粒径ごとに整理した結果は図2に示すようであった。これによれば、フライアッシュにおいては、粒径は20μ以下であり、また5μ以下に球状のものが多く含まれているのに対し、未粉碎の粗粒アッシュでは最大粒径が40μ程度以上であり、かなり大きい、5μ以下だけでなく、各サイズにわたり球状のものがかなり多いことが認められる。一方粉末度を高めるにともない、球状のものが著しく減少し、角状のものが増加しており、粉末度を3500 cm^2/g 程度としたものではフライアッシュにくらべ、5μ以下のサイズに角状のものが、相当に増加していることが認められる。

また、粉碎粗粒アッシュの表面性状を電子顕微鏡によって調べた結果によれば、フライアッシュの場合と異なり、粒子表面にかなり多くの開孔部分が見られ、また開孔部分の存在によって表面に生じている起伏は、粉碎の程度によってかなり異なっていることも認められた。このため、マイクロメタリテックス社の窒素吸着測定装置により、粉碎粗粒アッシュの単分子吸着量(以下B.E.T.値と略称する)を測定した結果は表2に示すようであった。B.E.T.値は粒子の外部表面積のほか、粒子表面に開孔として存在する細孔の内壁における内部表面積をも表わしたものである。なお、おむね粒子の全表面積を示したものと考えることができよう。一方、ブレン法による粒子表面積の測定は、空気透過法によるものであるために、粒

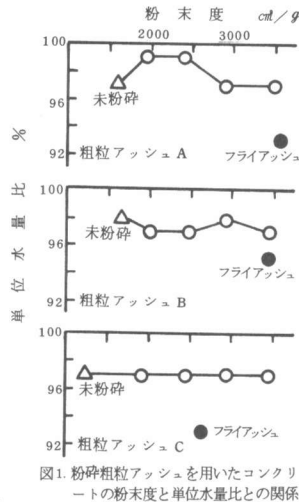


図1. 粉碎粗粒アッシュを用いたコンクリートの粉末度と単位水量比との関係

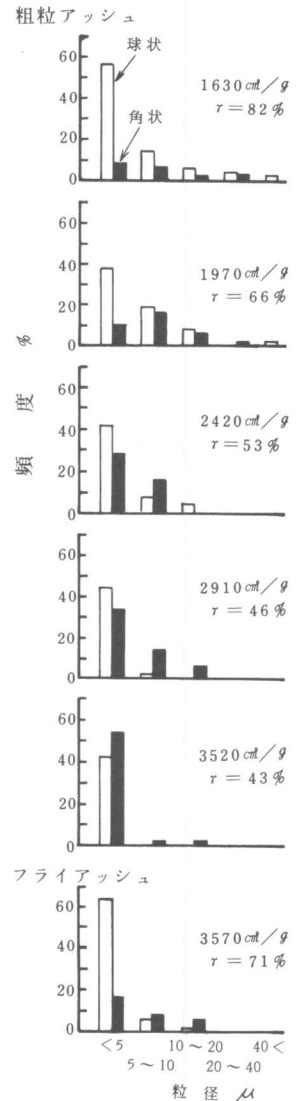


図2. 粉碎粗粒アッシュの粒径分布 (r: 球状のものの百分率)

表2 粉碎粗粒アッシュの表面形状係数

粉碎粗粒アッシュ ¹⁾	ブレン比表面積 cm^2/g		表面形状係数
	A	B	
未 粉 碎	1630	13300	8.16
粉 碎	1	1970	7.92
	2	2420	6.94
	3	2910	6.49

注 1) 粗粒アッシュ: A社のもの
2) B.E.T.値: 窒素吸着法により求めた値

子の表面に細孔が存在した場合においてもその内部表面積まで求めることはほとんど不可能であり、したがって測定値は外部表面積を表わしたものとみなすことができよう。したがって、窒素吸着法で求めた全表面積とブレン法によって求めた外部表面積の比として表わす表面形状係数は、粒子表面の起伏の程度を示しているものと考えられる。表2によれば、粉末度を大きくするにともない、表面形状係数は小さくなることが示された。すなわち、粗粒アッシュを粉砕することにより、粒子表面の起伏は減少することを示しているものと考えられる。粉砕粗粒アッシュの細孔半径の分布状態を、上記の窒素吸着法により測定した結果は図3に示すようであり、粉末度を大きくすることにより、卓越している細孔半径がかなり小さいサイズに移行していることが示された。したがって、このことから粉砕によって、表面の比較的大きい開孔が減少し、表面は平滑化されるものと考えることができよう。

粗粒アッシュを用いたコンクリートのワーカビリティは、粒度、粒形、表面性状等の複雑な要因によって影響を受けるものであるので、断定的なことは言い難いが、粉砕によって粉末度を相当に大きくして用いても、単位水量がほとんどかわらないのは、粉砕することによって、球状のものが減少し、角状のものが増加する影響と、粉砕のため表面の起伏が減少することによる効果とが相殺しているためと思われる。

3. 粉砕粗粒アッシュを混用したコンクリートの圧縮強度

粉砕粗粒アッシュを混用したコンクリートの強度性状について検討するため、3種の粗粒アッシュを対象として、コンクリートを20℃の水中で養生した場合について圧縮強度試験を行い、粗粒アッシュを混用しない場合の圧縮強度と比較して求めた圧縮強度比は図4に示すようであった。

これによれば、材令7日および28日における圧縮強度比は、粗粒アッシュの種類および粉末度によっていくぶん異なるが、それらの違いによる影響は比較的小さく、またフライアッシュの場合に比べて多少小さい傾向にあるものの、大差ないことが示された。すなわち、たとえば、材令28日における3種の粗粒アッシュの圧縮強度比は未粉砕のものを用いた場合62～68%、また粉砕したものでは61～74%の範囲にあり、またフライアッシュでは66～74%であった。これらにいちじるしい差は認められなかった。しかし、材令91日および6月においては、粉末度を大きくして用いた場合には強度発現が大きくなり、圧縮強度比は粉末度に応じて増加することが明瞭に示された。このように長期の材令で強度発現が著しく表われるのは、表2にも示したように、粉末度の増大にともなって、粒子の全表面積が増加し、ポズラン反応が活発化したことによるものと考えられる。

なお、粗粒アッシュを粉砕してフライアッシュと同程度の粉末度にまで高めて用いた場合、その強度比は材令28日まではフライアッシュの場合と大差ない

が、材令91日および6月では、フライアッシュに比べ5～10%程度小さいことも示された。しかし、このような圧縮強度比の差は、材令が経過するにともなって減少する傾向にあり、長期材令では実用的には無視できる程度であると思われる。

粉砕粗粒アッシュの使用がオートクレーブ養生を行なうコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について考察するため、単位結合材量を500kgとし、Aの発電所から採取した粗粒アッシュを粉砕して混用した場合についてのコンクリートの圧縮強度試験を行なった結果は図5に示すようであった。これによれば、粉砕粗粒アッシュの置

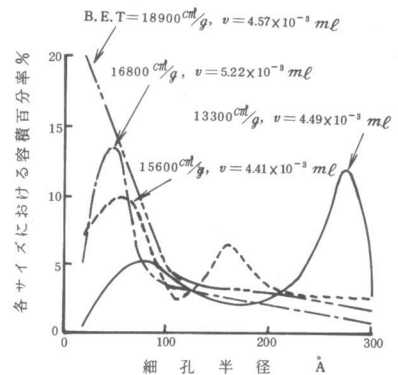


図3. 粉砕粗粒アッシュの細孔半径分布 (v: 全細孔容積)

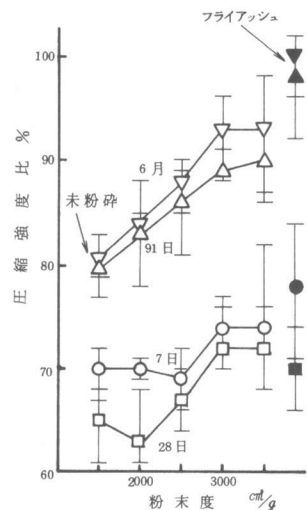


図4. 粉砕粗粒アッシュを用いたコンクリートの粉末度と圧縮強度比の関係

換率を大きくするに伴ない、圧縮強度は低下するが、置換率を5%及び10%とした場合には、フライアッシュの場合と同様、用いない場合とくらべ大差ないことが示された。すなわち、置換率を25%とした場合の圧縮強度比は粉末度を大きくするに伴ない増大するが、78~86%程度であって、用いない場合にくらべかなり小さい値を示しているのに対し、10%及び5%の場合には、それぞれ95~100%及び101~105%に達し、またフライアッシュの場合においてそれぞれ99%及び101%であるのとくらべても、ほとんどかわらないことが示された。

4. 炉底灰を細骨材として用いたコンクリートのワーカビリティおよび圧縮強度

炉底灰は微粉炭を燃焼するさいに、ボイラーの内壁に付着した溶融のアッシュをボイラー底部の水槽に落下させ急冷して得られたものであり、フライアッシュ、粗粒アッシュなどくらべかなり粗粒のものである。これを5mm以下、2.5mm以下、1.2mm以下、0.6mm以下および0.3mm以下の各サイズにふるい分け、川砂の一部に置換えて用いたコンクリートについて試験を行なった結果は図6.に示すようであった。これによれば、川砂の一部を炉底灰によって置換えることにより、コンクリートの圧縮強度はかなり小さくなるが、置換えるサイズを小さくすれば、強度の低下は相当に小さくなることが示された。すなわち、川砂のみを用いた場合の圧縮強度に対する比は、全量を置換えたコンクリート

では34%にすぎないが、たとえば0.6mm以下あるいは0.3mm以下を置換えた場合には、それぞれ58%あるいは76%に増大することが認められた。炉底灰から得られた砂は、通常細骨材にくらべ、著しく角状をなし、また粒の表面はかなり粗であるため、所要のワーカビリティを得るに要する単位水量は1~10%増加するが、0.6mm程度以下のものを用いるのであれば、ブリージングは減少し、ワーカビリティは向上する傾向にあることが認められた。

実験の範囲に限られているため、断定的なことは云い難いが、つぎのことが云えると思われる。

- 1) 粉砕した粗粒アッシュによりセメントの25%を置換えて用いたコンクリートの単位水量は良質なフライアッシュを用いた場合にくらべいくぶん大きいですが、用いないものにくらべて3%程度減少する。また、粗粒アッシュの粉末度を高めて用いても、単位水量に及ぼす影響はかなり小さく、未粉砕のものを用いた場合とほとんどかわらない。粗粒アッシュの粉末度を高めても、単位水量がほとんど変化しないのは、主として粉砕によって粒子が角状化することによる悪影響が、粒子表面の平滑化による効果によって打消されるためと思われる。
- 2) 粗粒アッシュを粉砕して用いたコンクリートの圧縮強度は、材令91日以降の長期材令においては粉末度を大きくすることにより増大するが、材令28日では粉末度による影響はかなり小さい。
- 3) 粉砕粗粒アッシュを用いオートクレープ養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、粗粒アッシュによるセメントの置換え率を5~10%とするのであれば、用いないものとくらべ同程度の値を示し、良質なフライアッシュを混用した場合とほとんどかわらない。
- 4) 炉底灰は内部に多くの空隙を含んでいるため、細骨材として用いればコンクリートの圧縮強度はかなり低下するが、0.3~0.6mm以下程度の小さいサイズを用いるのであれば、強度低下はかなり小さくできる。

以上要するに、石炭火力発電所から副産される粗粒アッシュはあまり微粉砕しなくても、混和材として有効に活用することが可能であり、また炉底灰は、細骨材の粒度調整の目的で細粒として使用するのであれば、利用できる場合も少なくないと考えられる。

本研究を行うにあたり、文部省科学研究費補助金の交付を受けたことに対し、謝意を表します。実験用試料の採取は、電発フライアッシュK.K.太資宗一氏の御厚意によるものであることを記し、感謝致しますとともに、実験に精励された法政大学工学部土木工学科コンクリート実験室の方々へ深謝します。

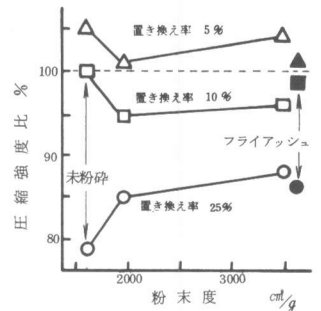


図5. オートクレープ養生した粉砕粗粒アッシュコンクリートの圧縮強度と粉末度の関係 (A社)

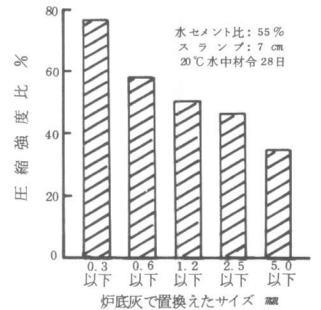


図6. 川砂の一部を炉底灰で置換えたコンクリートの圧縮強度